

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.04.002

镉胁迫下空心菜叶绿素质量分数的高光谱估算^①

顾艳文, 李帅, 高伟, 魏虹

西南大学 生命科学学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 为实现高光谱技术快速检测空心菜镉污染, 探索性地对其叶绿素质量分数的变化情况进行了高光谱估算. 采用盆栽试验检测了空心菜在 6 个不同的镉质量分数梯度 0 mg/kg (CK), 0.5 mg/kg (T1), 1 mg/kg (T2), 5 mg/kg (T3), 10 mg/kg (T4), 20 mg/kg (T5) 下的叶片高光谱反射率及其叶绿素质量分数. 根据不同镉质量分数处理下空心菜叶片高光谱反射率的变化, 对光谱数据重采样, 分析了叶绿素质量分数与光谱数据的相关性, 筛选出不同质量分数镉处理情况下与叶绿素质量分数敏感的光谱波段及特征参数, 并建立了预测叶绿素质量分数的估算模型. 研究表明: 1) 随着镉质量分数的增加以及胁迫时间的延长, 总叶绿素质量分数呈先增加后减少的趋势. 15 d, 30 d 和 45 d 的叶片光谱变化趋势相似, 在绿峰和红外波段范围差异较明显. 处理 45 d 时, 其差异比 15 d 和 30 d 时更显著; 2) 重采样后绿峰和红边范围的波段与叶绿素质量分数具有较好的相关性 ($p < 0.01$), 相关性最优的波段 R540, R710 为自变量与叶绿素质量分数拟合的 R^2 值分别为 0.747 7, 0.713 5 ($p < 0.01$), 故选择其作为敏感波段; 3) 对 12 个光谱敏感参数、R540 和 R710 与叶绿素质量分数进行相关分析、建模并反演, 得出 R540, R710, GPR 和 SGP 对应的非线性倒数模型效果较优, 可用于空心菜叶绿素质量分数的估算. 研究结果可进一步为检测空心菜镉污染程度提供技术参考.

关键词: 空心菜; 高光谱反射率; 敏感参数; 估算模型

中图分类号: X836

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)04-0009-08

近年来, 食品安全越来越成为人们关注的热点问题. 工业废弃物的排放、农耕不合理施肥等造成了土壤的严重污染. 调查结果显示, 目前我国重金属污染的土壤总面积已达 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国耕地面积的 $1/5$ ^[1], 直接影响农作物和农产品的食用安全^[2]. 镉(Cd)是毒性最强的重金属之一, 水溶性强, 极易被植物吸收. 与其它农作物相比, 蔬菜对重金属镉的富集能力较强^[3], 当土壤镉质量分数达到 1 mg/kg 时, 叶类蔬菜很难达到卫生安全标准^[4](鲜样镉质量分数 $\leq 0.2 \text{ mg/kg}$), 直接影响到人类健康. 所以对蔬菜进行镉污染监测非常重要, 其污染程度可以通过植物的一些生理指标来判断. 叶绿素质量分数是检测植物胁迫、光合能力和生长发育等的一个重要指标^[5]. 不同质量分数镉胁迫会对蔬菜叶绿素质量分数产生不同影响, 可将受污染蔬菜的叶绿素质量分数用于推测其镉污染程度.

传统的化学分析方法虽然能精准测定叶绿素质量分数和营养品质, 但必须采用破坏性采样分析, 且会造成蔬菜损害, 大面积检测费时、费力、成本高. 高光谱遥感技术在检测植物水分、氮、生物量和叶绿素质量分数等方面已得到广泛应用, 能够在叶片、群落和生态系统等多层水平上高效、快速、无

① 收稿日期: 2014-04-21

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstc2012jjA80003); 重庆市基础与前沿研究计划重点项目(CSTC2013JJB00004); 中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2013A011).

作者简介: 顾艳文 (1989-), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要从事应用生态学的研究.

通信作者: 魏虹, 博士, 教授.

损检测叶绿素质量分数,取得了较好的研究成果.国内外许多学者利用高光谱遥感技术进行叶绿素密度检测,并进一步用各种统计方法对大量实验数据、图像等进行了分析处理.刘秀英等^[6]采用高光谱遥感技术提取了樟树幼林叶绿素质量分数的敏感波段,发现分别位于 400,556 和 621 nm.王强等^[7]构建了棉花冠层叶绿素密度的预测模型,由 DR_{635}/DR_{643} 为自变量的模型所得到的棉花冠层叶绿素密度估算值与实测值拟合最好,相关系数达 0.821.人们利用定量分析法估算了黑河流域作物的叶绿素质量分数^[8],采用小波分析法对镉污染水稻叶片的反射率曲线进行分形处理,获取了镉污染导致的光谱变化信息^[9].已有的研究报道探索了不同层次、不同植物叶绿素敏感的光谱波段及定量分析叶绿素的方法,但利用高光谱技术研究镉污染下蔬菜叶绿素质量分数的报道还较为少见.本试验以空心菜 (*Lpomoea aquatica* F.)为材料,研究镉污染下叶绿素质量分数与高光谱反射率之间的相关性,筛选对叶绿素质量分数敏感的光谱波段、特征参数,进而建立估算叶绿素模型,预测空心菜受镉污染后叶绿素质量分数的变化情况,为进一步检测空心菜镉污染程度提供技术参考.

1 材料和方法

1.1 试验材料及培养、处理

试验材料为空心菜 (*Lpomoea aquatica* F.)种子,由重庆市洪圣蔬菜种子有限公司制种.

试验土壤取自西南大学生态园,自然风干,过 2 mm 筛,然后分别加入不同质量分数的重金属镉(以 Cd^{2+} 质量分数计),混匀.试验设 6 个处理:CK(0 mg/kg),T1(0.5 mg/kg),T2(1 mg/kg),T3(5 mg/kg),T4(10 mg/kg),T5(20 mg/kg),3 个重复.将混合好的镉污染土壤装盆,每盆 2 kg,浇水,培植 30 d 备用.

选取饱满、均匀的空心菜种子,用 1%次氯酸钠溶液浸泡 15 min,去离子水反复冲洗,用滤纸将水分吸干后置于铺有湿润纱布的托盘中,于培养箱中催芽 24 h.然后播种到试验土壤中,每盆 10 粒.出苗 7 d 后选苗定植,每盆保留 3 株幼苗.

1.2 数据获取

1.2.1 光谱采集

采用美国生产的 ASD FieldSpec 3 HR 型便携式光谱仪,在 350~2 500 nm 波长范围内进行连续测量.350~1 100 nm 采样间隔为 1.4 nm,1 000~2 500 nm 采样间隔为 2 nm;350~1 100 nm 光谱分辨率为 3 nm,1 000~1 900 nm 光谱分辨率为 8.5 nm,1 700~2 500 nm 光谱分辨率为 6.5 nm.

叶片光谱采集:将叶片用叶片夹持器固定,使用植被探头测定叶片光谱.每个重复(每盆)选取幼苗顶端 3 枚叶片(第 2,3,4 叶)进行测量.每片叶测 10 次,将 3 枚叶片的光谱数据平均后作为该重复的叶片光谱反射率.在定植后加镉处理,15 d,30 d,45 d 分别进行光谱反射率测定,共采集 3 次.

1.2.2 叶绿素质量分数测定

光谱采集完成后,将相应叶片取样带回实验室进行叶绿素质量分数测定.采用浸提法^[10]用岛津 UV2550 分光光度计测定 663 nm,645 nm,470 nm 3 个波段的吸光度计算叶片叶绿素质量分数(总质量分数,mg/g).

1.3 数据处理

1.3.1 光谱数据预处理

重采样:Kemper^[11]认为,采样间隔为 5,10 和 20 nm 时可平滑曲线,减少噪声的影响,可降低拟合造成的影响;而 Goetz^[12]认为,10 nm 的采样间隔可以实现对某些特征进行诊断评价.本研究对光谱数据以 10 nm(R_{510} 表示 510 nm~519 nm 的光谱反射率平均值,下同)为间隔进行算术平均运算.处理后的光谱曲线更加平滑,同时能保持原光谱的形状特征.

1.3.2 叶片反射率与敏感波段选择

由于 1 300 nm 以后的光谱区间受水汽吸收影响显著,所以本研究选择 350~1 300 nm 作为有效光谱波段,观察镉胁迫下空心菜叶片反射率的变化.为进一步研究镉胁迫对空心菜叶片叶绿素的影响,根据叶

片光谱反射率特征,选择400 nm~899 nm特征波段,将光谱数据以10 nm为间隔进行算术平均运算(重采样),共得到50个波段.将以上新的光谱波段与叶绿素质量分数进行相关分析,筛选出相关系数较大的若干波段作为反映叶绿素质量分数变化的敏感波段.

利用ViewSpec Pro处理软件将测得的叶片反射光谱数据进行初步处理,并通过Excel2003,SPSS20.0和Origin8.5对数据进行统计分析和绘图.

2 结果与分析

2.1 不同质量分数镉胁迫对空心菜的叶绿素质量分数的影响

空心菜叶片叶绿素质量分数随镉处理质量分数和处理时间的增加而下降(表1).与对照相比,处理15 d时,T4,T5组叶绿素质量分数显著降低;T5组最低(1.473 mg/g),比对照降低17.4%.30 d时,T3,T4,T5组叶绿素质量分数均显著降低;T1组略高于对照,但差异无统计学意义($p>0.05$).45 d时,T5组叶绿素质量分数显著降低;T3,T4,T5组随镉质量分数升高呈递减趋势,且低于对照;T1组叶绿素质量分数显著高于对照;T2组与对照差异无统计学意义($p>0.05$).

表1 不同镉质量分数下空心菜叶绿素质量分数的动态变化

处 理	叶绿素质量分数/(mg·g ⁻¹)		
	15 d	30 d	45 d
CK	1.783±0.037a	2.357±0.023a	2.533±0.018bc
T1	1.833±0.068a	2.470±0.135a	2.867±0.048a
T2	1.763±0.041ab	2.237±0.038ab	2.650±0.089ab
T3	1.707±0.078ab	2.083±0.081bc	2.427±0.039bc
T4	1.590±0.046bc	2.037±0.081bc	2.287±0.025cd
T5	1.473±0.038c	1.960±0.010c	2.140±0.062d

注:表中小写字母不同表示在同一时间各处理之间差异有统计学意义, $p<0.05$.

2.2 镉胁迫下空心菜叶片光谱反射率的变化

由图1可知,各处理组空心菜叶片的光谱曲线具有明显的绿色植物光谱反射特征.在可见光区的绿峰波段(540~570 nm)出现一个小的反射峰.这是由于叶片内部叶绿素在蓝光波段和红光波段分别以450 nm与680 nm为中心的两个强烈吸收带所致.在红边位置(680~750 nm)光谱迅速上升,是叶绿素对红光的强烈吸收和叶片内部对光的散射形成的,此波段范围富有大量植被信息.而在近红外区(750~1 300 nm)出现一个很强的反射峰,反射率达到40%~60%.

同时,在可见光范围内,空心菜叶片反射率呈现有规律的变化.处理15 d,30 d时,叶片反射率在350~1 300 nm波段范围内变化,与处理45 d时的变化(图1)基本呈现相同趋势,但变化趋势不明显(图未给出).处理45 d时,绿峰和红边区的叶片反射率均随镉质量分数的增加呈明显下降趋势,与15 d和30 d相比较,各处理组反射率差异随着处理时间的延长而逐渐增加.在绿峰波段,CK组的反射率最大,其它处理组随质量分数的增大而降低;在近红外波段,T1,T2组反射率变化较小,T3,T4,T5组的叶片反射率均明显低于对照,特征响应叶绿素质量分数变化,为建立预测叶绿素质量分数的模型估算提供了依据.

2.3 镉胁迫下空心菜叶绿素敏感光谱波段筛选

将重采样的50个波段与叶绿素质量分数进行相关分析,发现特征波段与叶绿素质量分数相关系数较高($r>0.08$)的波段范围主要为R510-R600和R690-R730(图2),均通过 $p=0.01$ 水平检验.由此可知,空心菜的绿峰和红边光谱波段与空心菜叶片叶绿素质量分数相关性较高.选择其中相关系数较高的R710($r=0.867$)和R540($r=0.848$)作为反演叶绿素质量分数的敏感波段,以R540,R710的光谱反射率为自变量,空心菜叶片叶绿素质量分数为因变量,进行一元线性回归,均通过显著性检验($n=54$, $p<0.01$),表现出较好的拟合, R^2 值分别为0.713 5和0.747 7($p<0.01$).

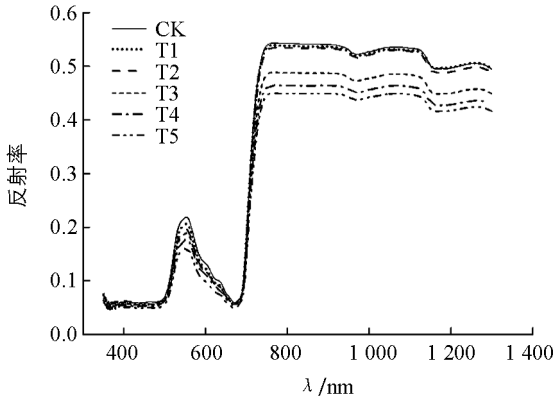


图 1 45 d 各处理组叶片反射光谱曲线

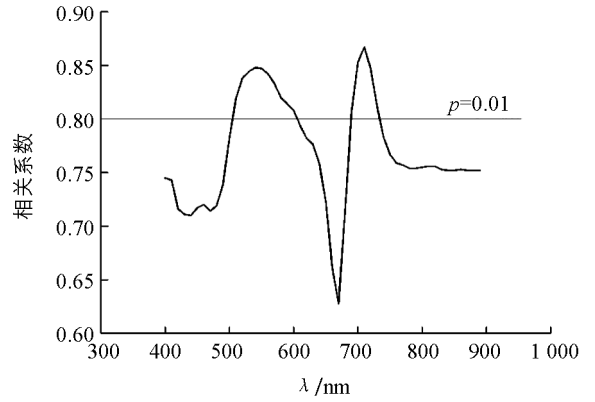


图 2 重采样后的 50 个波段与叶绿素质量分数的相关分析系数

2.4 镉胁迫下空心菜叶绿素敏感参数筛选

空心菜的绿峰波段和红边光谱波段与叶片叶绿素质量分数相关性较高,其敏感光谱指数见表 2.

表 2 估算叶片叶绿素质量分数的常用高光谱指数

光谱特征参数	参数说明与算法
Dr (红边幅值)	红边范围内的二阶导数最大值
REP (红边位置)	Dr 对应的波长位置(nm)
GPR (绿峰反射率)	510~560 nm 内光谱反射率的最大值
GPP (绿峰位置)	GPR 对应的波长位置(nm)
SDr (红边面积)	红边范围内二阶导数波段值的总和
SGP (绿峰面积)	在 510~560 nm 内原始光谱曲线所包围的面积
GRR	绿峰反射率与红谷反射率的归一化值
$GNDVI$	$(r_{750}-r_{550})/(r_{750}+r_{550})$
$RVI(700)$	r_{750}/r_{700}
$RVI(550)$	r_{750}/r_{550}
$NDVI(705)$	$(r_{750}-r_{705})/(r_{750}+r_{705})$
$VOG1$	r_{740}/r_{705}

通过相关分析, $REP, GNDVI, RVI(700), NDVI(705), RVI(550), VOG1$ 与叶绿素质量分数呈极显著负相关($p < 0.01$); 除 GPP 外, 其它光谱参数与叶绿素质量分数呈极显著正相关($p < 0.01$). 其中, 光谱参数 GPR, SGP, SDr 和 GRR 与叶绿素的相关性系数 $|r|$ 均大于 0.8(表 3). 因此将这 4 个光谱参数作为叶绿素质量分数敏感参数, 用于建立预测叶绿素质量分数的估算模型.

表 3 光谱参数与叶绿素质量分数的相关分析($n=54$)

光谱参数	相关系数(r)	光谱参数	相关系数(r)
Dr	0.739**	$RVI(700)$	-0.660**
REP	-0.632**	$NDVI(705)$	-0.647**
GPR	0.848**	$RVI(550)$	-0.713**
GPP	0.218	$VOG1$	-0.661**
SDr	0.826**	$GNDVI$	-0.700**
SGP	0.844**	GRR	0.807**

注: * 表示差异有统计学意义($p < 0.05$), ** 表示差异有统计学意义($p < 0.01$).

2.5 估算模型的建立

将所测空心菜叶绿素质量分数的样本数据随机划分为 2 组, 样本的 2/3 用于建模, 1/3 用于模型验证. 根据敏感波段和参数筛选结果, 选取 $R540, R710$ 和表 3 中相关系数大于 0.8 的光谱参数 GPR, SDr, SGP

和 GRR 为自变量, 空心菜叶片叶绿素质量分数为因变量, 分别进行一元线性和非线性回归建立模型。

对叶绿素质量分数线性和非线性回归建模, 选择 R^2 较大的线性、对数、倒数和二次方程曲线所建的模型(表 4)。其中, 以 $R540$, $R710$ 和 GPR 为自变量的各模型的校准 R^2 均大于 0.75, 验证 R^2 均大于或接近 0.7; 在以 SGP 为自变量的模型中, 除线性模型的校准 R^2 小于 0.75, 验证 R^2 小于 0.7 外, 其它模型的校准 R^2 均大于 0.75, 验证 R^2 均大于 0.7。

相关研究表明, 可采用均方根误差($RMSE$)检验模型精度^[13]。 $RMSE$ 值越小, 模型精度越高^[14]。在以 $R540$, $R710$, GPR 和 SGP 为自变量的模型中, 倒数模型的 $RMSE$ 值均最小, 且该模型的校准 R^2 和验证 R^2 与其它模型相比差异均较小。综上结果, 选择 $R540$, $R710$, GPR 和 SGP 为自变量的倒数模型作为较优模型。

表 4 叶绿素与高光谱变量的线性和非线性模型参数表

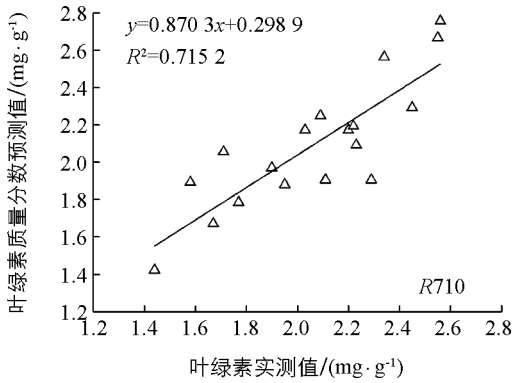
参数	模型	方 程	校准样本($n=36$)		验证样本($n=18$)	
			R^2	p	R^2	$RMSE$
$R540$	线性	$y=14.053x-0.207$	0.751	<0.01	0.690	0.215
	对数	$y=2.323\ln(x)+6.832$	0.764	<0.01	0.705	0.567
	倒数	$y=4.415-0.370/x$	0.761	<0.01	0.715	0.192
	二次	$y=-79.232x^2+40.635x-2.377$	0.771	<0.01	0.721	0.194
$R710$	线性	$y=11.768x-1.584$	0.781	<0.01	0.676	0.198
	对数	$y=3.664\ln(x)+6.376$	0.777	<0.01	0.702	0.190
	倒数	$y=5.733-1.125/x$	0.767	<0.01	0.718	0.184
	二次	$y=3.845x^2+9.339x-1.206$	0.781	<0.01	0.719	0.200
GPR	线性	$y=13.826x-0.217$	0.750	<0.01	0.679	0.214
	对数	$y=2.333\ln(x)+6.3$	0.763	<0.01	0.705	0.201
	倒数	$y=4.428-0.379/x$	0.771	<0.01	0.721	0.192
	二次	$y=-77.671x^2+40.423x-2.433$	0.773	<0.01	0.723	0.193
SDr	线性	$y=11.644x-1.54$	0.702	<0.01	0.628	0.205
	对数	$y=3.626\ln(x)+6.335$	0.695	<0.01	0.634	0.204
	倒数	$y=5.701-1.114/x$	0.684	<0.01	0.636	0.204
	二次	$y=20.390x^2-1.224x+0.47$	0.704	0.01	0.635	0.208
SGP	线性	$y=0.316x-0.16$	0.741	<0.01	0.678	0.215
	对数	$y=2.278\ln(x)-2.350$	0.756	<0.01	0.706	0.202
	倒数	$y=4.374-15.811/x$	0.756	<0.01	0.724	0.191
	二次	$y=-0.044x^2+0.961x-2.456$	0.766	<0.01	0.728	0.192
GRR	线性	$y=78.463x-0.716$	0.652	<0.01	0.677	0.197
	对数	$y=2.870\ln(x)+11.672$	0.671	<0.01	0.701	0.190
	倒数	$y=5.001-0.102/x$	0.680	<0.01	0.717	0.183
	二次	$y=-3769.263x^2+354.407x-5.687$	0.694	<0.01	0.734	0.366

采用所选较优模型对实测叶绿素质量分数和预测叶绿素质量分数进行线性拟合, 结果见图 3。结果表明, 模型估算效果较好, 实测值与预测值相关性较强。

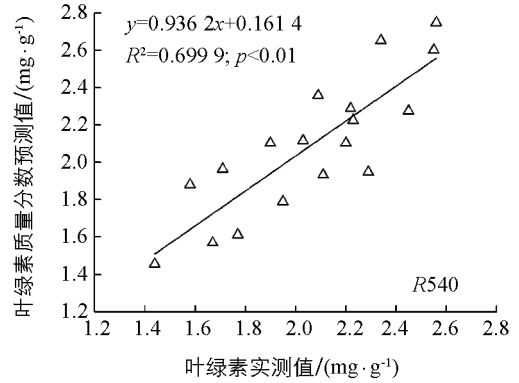
3 讨论与结论

植被的光谱特征主要由植物的色素成分及质量分数、细胞结构和含水量等生理特征决定。叶绿素是绿色植物主要的光合色素, 其质量分数变化与植物的生长状况密切相关。基于高光谱技术的大量研究^[10, 11]之后, 本研究进一步将该技术用于镉胁迫下空心菜叶绿素变化的信息提取。结果表明, 随着 Cd^{2+} 处理质量分数的增加, 叶片叶绿素质量分数和反射率在绿峰和近红外区均呈下降趋势, 与金铭对镉污染水稻光谱的研究结果相似^[15]。在 45 d 时, 绿峰波段和近红外区的反射率随着胁迫时间的延长, 与对照的反射率相比变化趋势越明显, 这可能是 Cd^{2+} 在空心菜叶片中积累量增加, 破坏了细胞结构, 影响了光合

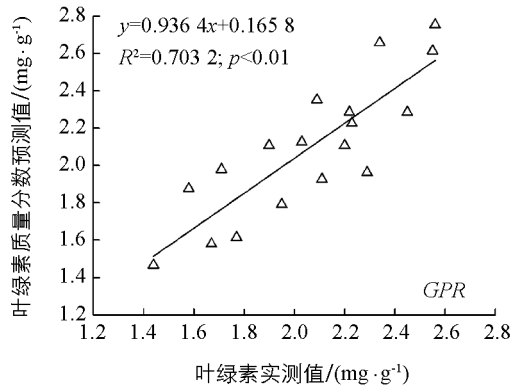
作用和正常的生理平衡,导致叶片叶绿素质量分数降低^[16]和水分、营养物质变化,对绿光和近红外区域光谱的反射能力下降。



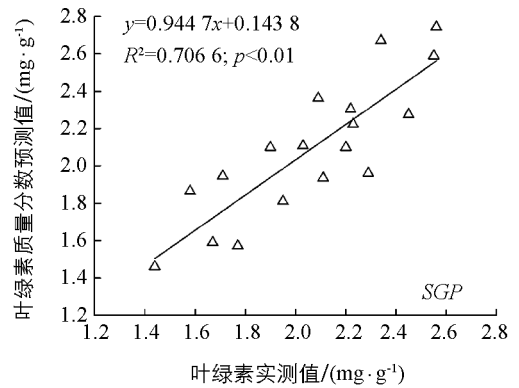
(a) R710模型的叶绿素预测值与实测值的拟合



(b) R540模型的叶绿素预测值与实测值的拟合



(c) GPR模型的叶绿素预测值与实测值的拟合



(d) SGP模型的叶绿素预测值与实测值的拟合

图 3 实测叶绿素质量分数与模型预测值的结果比较 ($n=18$)

植物可见光区光谱曲线的变化主要受叶绿素质量分数控制. 宋开山等^[14]在大豆叶片叶绿素质量分数反演研究中,将 536,577,611,680 和 705 nm 确定为敏感波段;任艳芳等^[16]发现铅污染水稻反映叶绿素质量分数变化的高光谱敏感特征波段为 520~560 nm 和 630~690 nm. 本研究发现,空心菜叶绿素敏感的特征波段主要也在绿峰波段和红边范围光谱波段,叶绿素质量分数与 R540,R710 的相关性最优(图 1). 这可能是因为镉胁迫下叶绿素质量分数下降,对绿光、红光的吸收和反射能力发生了变化. 这一结果与方慧等^[17]研究氮肥胁迫下油菜的光谱特性一致,与关丽等^[18]对镉污染水稻的研究结果相似,其差异可能是由于物种的不同所造成的. 结合上述结果,我们进一步选择与绿峰和红边波段相关的 12 个光谱特征参数与叶绿素质量分数进行相关分析,得到了相关系数大于 0.8 的 4 个特征参数: GPR,SGP,SDr 和 GRR.

高光谱估算模型可应用于反演植物叶绿素质量分数. 有研究表明,以绿峰位置^[18]和红边位置的敏感波段和特征参数^[19]建立模型可以较好地反映叶绿素质量分数,与本研究筛选 R540,R710,SGP 和 GPR 建立模型相似. 干旱胁迫下小麦的光谱红边位置参数与叶绿素质量分数呈线性关系, $R^2=0.87$ ^[19];参数的倒数对数模型、指数模型能够较优地估算桉树叶绿素质量分数^[13];水浇和干旱下线性和抛物线模型是估测叶绿素质量分数变化的最佳模型^[20]. 在本研究中,R540,R710,SGP 和 GPR 为自变量的线性、对数、倒数和二次方程曲线模型的校准 R^2 和验证 R^2 相对较好,但与上述研究结果存在一定差异. 可能是因为镉胁迫对空心菜叶绿素质量分数产生的影响导致叶片光谱信息发生了变化,造成反演叶绿素质量分数的模型类型也发生了相应变化. 同时,分析方法的不同,也会对估算模型产生一定的影响. 本研究建立的 4 种模型的 RMSE 值大部分都在 0.1~0.3(表 5),模型精度较高. 同时,各模型的校准 R^2 值和验证 R^2 值差异不大,线性拟合的 R^2 值均接近 0.7,估算能力较为接近,说明这 4 个倒数模型均可用于镉胁迫下空心菜叶绿素质量分数

的估算. 又因植物叶绿素质量分数与重金属质量分数有密切的相关性, 因此结合这一特性能够达到对空心菜重金属污染程度的初步监测. 综上所述, 本研究结果为更精确地估算空心菜污染架起了桥梁, 但对于空心菜重金属质量分数的精确检测, 还需要对重金属质量分数进行进一步检测、分析.

在分析方法方面, 今后可考虑通过多重判别空间体系从不同层面检测蔬菜重金属污染情况^[21]. 对于镉处理时间、变化不明显的反射率光谱分析、光谱微小变化的分析方法等需要进一步研究, 对于倒数模型是否能比其他模型更好地反演叶绿素质量分数做深入探讨, 以便为生长周期短的空心菜叶绿素质量分数预测建立最优估算模型, 准确掌握镉污染下空心菜的生长情况.

参考文献:

- [1] 张 雯, 魏 虹, 孙晓灿, 等. 镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征 [J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6147—6153.
- [2] 崔冬霞, 刘应平, 曾宜君, 等. 蔬菜中 Cd 的积累与土壤环境的相关性分析 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(6): 133—137.
- [3] 胡 超, 付庆灵. 土壤重金属污染对蔬菜发育及品质的影响之研究进展 [J]. 中国农学通报, 2007, 23(6): 519—523.
- [4] 李素霞, 谢朝阳, 胡承孝, 等. 镉氮交互作用对苋菜生长及其营养品质的影响 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(2): 676—678.
- [5] 张永贺, 郭啸川, 诸武道, 等. 基于红边位置的木荷叶片叶绿素含量估测模型研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 798—804.
- [6] 刘秀英, 林 辉, 万玲凤, 等. 樟树幼林叶绿素含量的高光谱遥感估算模型 [J]. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(4): 49—54.
- [7] 王 强, 易秋香, 包安明, 等. 基于高光谱反射率的棉花冠层叶绿素密度估算 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 125—132.
- [8] LIU M L, LIU X N, DING W C, et al. Monitoring Stress Levels on Rice with Heavy Metal Pollution from Hyperspectral Reflectance Data Using Wavelet-Fractal Analysis [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 13(2): 246—255.
- [9] PENG J J, LIU Q, LI J H, et al. Quantitative Analysis of Crops Chlorophyll in the Heihe River Basin by Hyperspectral Remote Sensing Image [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012, 129: 681—689.
- [10] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 74—77.
- [11] THOMAS K, STEFAN S. Estimate of Heavy Metal Contamination in Soils After a Mining Accident Using Reflectance Spectroscopy [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(12): 2742—2747.
- [12] GOETZ A F H, HERRING M. The High Resolution Imaging Spectrometer (HIRIS) for Eos [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1989, 27(2): 136—144.
- [13] 张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 等. 桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型 [J]. 生态学报, 2013, 33(3): 876—887.
- [14] 宋开山, 张 柏, 王宗明, 等. 大豆叶绿素含量高光谱反演模型研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 16—21.
- [15] 金 铭. 水稻镉污染胁迫高光谱分形模型研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011: 8—9.
- [16] 任红艳, 庄大方, 潘剑君, 等. 铅污染水稻的冠层高光谱特征研究 [J]. 地球信息科学, 2008, 10(3): 314—319.
- [17] 方 慧, 宋海燕, 曹 芳, 等. 油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(9): 1731—1734.
- [18] 关 丽, 刘湘南. 水稻镉污染胁迫遥感诊断方法与试验 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 168—173.
- [19] 谷艳芳, 丁圣彦, 陈海生, 等. 干旱胁迫下冬小麦 (*Triticum aestivum*) 高光谱特征和生理生态响应 [J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2690—2697.
- [20] 靳彦华, 熊黑钢, 张 芳, 等. 水浇地与旱地春小麦新型光谱曲线特征变量与叶绿素关系的对比研究 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 66—71.
- [21] 曹 仕, 刘湘南, 刘慕霞. 基于高光谱指数的水稻砷污染胁迫多重判别模型 [J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2462—2468.

Hyperspectral Estimation for Chlorophyll Contents in the Leaves of *Lpomoea aquatica* F. Under Cadmium Stress

GU Yan-wen, LI Shuai, GAO Wei, WEI Hong

Key Laboratory for the Eco-Environment of the Three Gorges Reservoir Region of the Ministry of Education, School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to rapidly and non-destructively monitor heavy metal contamination of the leafy vegetable *Lpomoea aquatica* F., a potted experiment was conducted. Six different Cd concentrations treatments (CK, T1, T2, T3, T4 and T5) were established with 3 replicates per treatment, where CK, T1, T2, T3, T4 and T5 represented 0, 0.5, 1, 5, 10 and 20 Cd mg/kg dry soil. The hyperspectral reflective rate of fifty-four samples was scanned by ASD FieldSpec 3 HR and their chlorophyll concentrations were measured using Shimadzu UV2550 spectrophotometer on the 15th, 30th and 45th days after the beginning of treatments. Further, the correlation between spectral data and chlorophyll contents was analyzed, and the fitting models for chlorophyll contents were established using the sensitive spectrum and characteristic parameters. The results showed that total chlorophyll content decreased gradually with higher Cd concentration and longer treatment time. The differences of leaf reflectance among different treatments were significant at green peak and infrared wavelength. In the wave range of 350–1300 nm, the leaf reflectance showed a similar trend between the 45d and other treatments. However, the difference among the plant leaf reflectance under different Cd concentrations was more significant in the 45-d treatment, as compared to that in 15-d and 30-d treatments. In peak green and red edge range of wavelengths, the hyperspectral reflectance was well correlated with chlorophyll contents ($p < 0.01$), and R^2 of R_{540} and R_{710} with chlorophyll content was 0.753 and 0.719 respectively ($p < 0.01$) after data re-sampling. Therefore, R_{540} and R_{710} were extracted as the sensitive bands to construct estimation models. The linear, logarithmic, inverse and parabola fitting models between R_{540} , R_{710} , GPR and SGP and chlorophyll contents had better sensitivity compared with other spectral parameters, and the calibration R^2 and verification R^2 were approximately 0.75 and 0.7, respectively. In particular, the sensitivity of the nonlinear inverse fitting models of R_{540} , R_{710} , GPR and SGP was the best. In summary, this study showed that the nonlinear inverse fitting models of R_{540} , R_{710} , GPR and SGP could be applied to estimate *L. aquatica* chlorophyll contents under Cd stress.

Key words: *Lpomoea aquatica* F.; hyperspectral reflectance; sensitive parameter; estimation model

